

DOI: 10.35681/1560-9189.2020.22.3.218803

УДК 617.751

**В. В. Петров, Є. Є. Антонов, В. М. Зенін,
Д. Ю. Манько, С. М. Шанойло**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Моделювання та дослідження параметрів концентраторів світлових променів

Розроблено метод моделювання мікрорельєфних структур для створення концентраторів світлових потоків із заданими граничними кутами заломлення променів. Розраховано геометричні параметри рел'єфу кругового концентратора світлових потоків, який формує у фокусі лінзи рівномірно освітлене коло. Експериментально досліджено виготовлені за результатами моделювання деякі зразки фокусуєчих кільцевих пристроїв.

Ключові слова: мікрорельєфна структура, гомогенізація світлових променів, коефіцієнт пропускання, кутовий розподіл інтенсивностей, моделювання фокусуєчої оптики.

Вступ

Для деяких систем обробки світлових сигналів, які використовуються в оптичних пристроях для автоматичного регулювання вихідного сигналу з чотирьох-площинних фотоприймачів, необхідно перетворювати потік паралельних світлових променів у рівномірно освітлене світлове коло необхідного діаметра, сформоване на певній відстані від лінзи. Для розрахунку геометричних параметрів таких концентруючих лінз можна використати методи, розроблені авторами [1] для моделювання фокусуєчих пристроїв з плоскими в перерізі конусними кільцевими робочими гранями. При виготовленні таких пристроїв методом алмазного різання [2] можливо отримати практично дзеркальні робочі поверхні високої оптичної якості, однак розміри таких конусних зон не повинні бути занадто великими для зменшення дискретності зображень, які формуються. При створенні концентраторів світла основна відмінність від методу [1] полягає в тому, що замість формування у фокусі лінзи зображення джерела освітлення, в концентраторах променів необхідно у фокусі сформувати рівномірно освітлене світлове коло. В доступній відкритій літературі відсутні результати розрахунків таких структур, тому виконання подібних досліджень цілком доцільне.

© В. В. Петров, Є. Є. Антонов, В. М. Зенін, Д. Ю. Манько, С. М. Шанойло

Метод моделювання параметрів концентраторів потоків світла

Розглянемо типову схему (рис. 1) фокусуєчого мікрорельєфного пристрою [1], яку в подальшому будемо використовувати для розрахунку параметрів світлових концентраторів. За основу візьмемо варіант фокусуєчої структури з постійним кроком мікрорельєфу W , яка є більш технологічною при практичному виготовленні концентраторів. На рис. 1 зображено модернізовану схему типової структури зі змінним кроком і глибиною рельєфу, де f — фокусна відстань; n_0 та n_1 — показники заломлення середовища та матеріалу призматичної структури, відповідно; R_k — радіуси плоских конусних кільцевих зон $k = 1, 2, \dots, N$; α_k — кути заломлення мікропризм; γ_k — кут спостереження k -зони з центру фокальної площини F ; W — номінальний крок мікрорельєфу.

Кути падіння променів φ_{1k} дорівнюють кутам заломлення призм α_k , а кути рефракції φ_{2k} для кожної конусної зони k визначаються за законом Снеліуса [3]. Метою розрахунків є отримання значень кутів α_k для всіх плоских граней мікропризм, при яких для кожної зони відбувається фокусування паралельних променів пройденого світла в єдине центральне світлове коло.

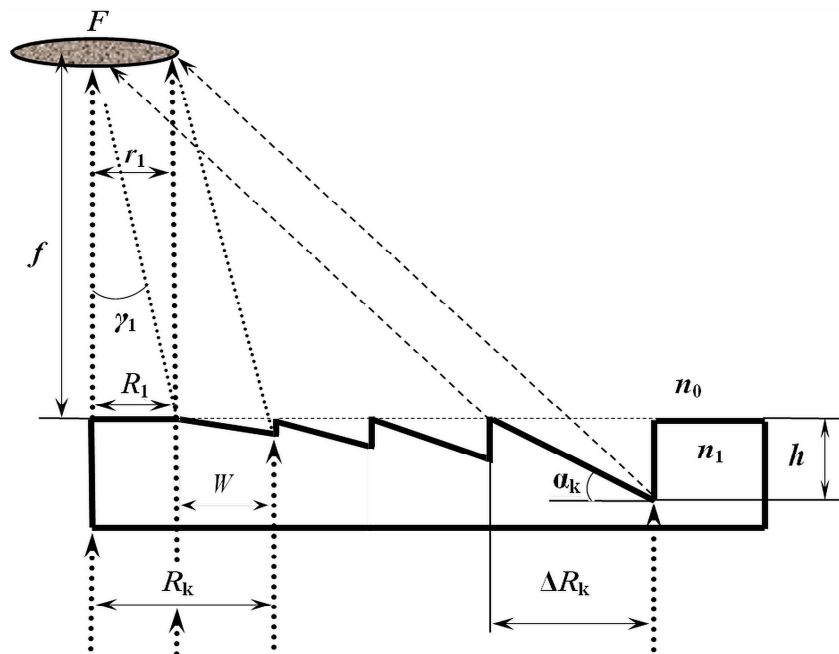


Рис. 1. Схема модернізованого кільцевого конусного фокусуєчого елемента Френеля

Особливістю фокусуєчих структур, створених методом алмазного різання, є дискретна зміна заломлюєчих кутів мікропризматичних зон, внаслідок цього виникає і дискретність сформованих у фокусі зображень, величина дискретності визначається шириною конусних кільцевих фокусуєчих зон. Це є принциповою відмінністю від френелівської фокусуєчої оптики з асферичними опуклими кільцевими поверхнями [4], коли кути заломлення змінюються безперервно і за допомогою таких структур теоретично можливо сформувати з паралельного пучка світла у фокусі точкове зображення. Високоякісні такі зображення практично не реалі-

зуються із-за дефектів асферичних поверхонь. Більшість зазначених структур створюється методами фотолітографії або регульованим прямим лазерним записом на фоторезисті. Такі методи дозволяють формувати відомі ступінчаті кіноформні структури [4], в той час як алмазне різання забезпечує практичне виготовлення заломлюючих поверхонь дзеркальної якості з мінімумом оптичних дефектів.

Алгоритм розрахунків фокусувальної структури для реалізації метода алмазного різання передбачає на першому етапі визначення розміру центральної зони з радіусом R_1 , яка при виготовленні лінзи залишається плоскою. Розмір цієї зони визначається, перш за все, технологічними вимогами. При виготовленні структури методом алмазного різання [2] швидкість обертання алмазного різця дорівнює нулю в точці $R_1 = 0$, тому значення R_1 не може бути дуже малим. З іншого боку, для формування високоякісних візуальних зображень радіус R_1 не може бути і великим — збільшення значення R_1 підвищує дискретність зображень, які формуються лінзою. Зазвичай, плоска поверхня в центрі типової фокусувальної структури для формування прецизійних візуальних зображень встановлюється з радіусом $R_1 = 1,0\text{--}1,2$ мм. Розмір цієї зони і визначає величину дискретності зображень, які формуються.

Для розглянутої моделі лінзи значення радіусів R_k наступних нахилених зон пов'язані з розміром центральної плоскої зони R_1 . Розрахункові глибини рельєфу h та ширини зон W поступово збільшуються, що необхідно для концентрації заломлених променів для зон лінзи ΔR_k в центральній зоні r_1 фокальної площини.

Після визначення радіусу центральної зони R_1 в точці $R = R_1$ визначається кут γ_1 заломлення променів першою нахиленою зоною $k = 1$, з якого за законом Снеліуса [3] знаходиться значення кута нахилу φ_1 цієї кільцевої зони. При такому куті заломлення промінь з точки $R = R_1$ спрямовується в центр зображення в площині фокуса F . Кут φ_1 при розрахунках параметрів лінзи визначає заломлюючий кут $\alpha_1 = \varphi_1$ для всіх променів, що проходять через першу кільцеву призмову структуру:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{tg}^{-1}(R_1 / f), \\ \varphi_1 &= \text{tg}^{-1}\{\sin \gamma_1 / (n_1/n_0 - \cos \gamma_1)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Оскільки всі промені, які пройшли через першу конусну зону лінзи шириною $\Delta R_1 = (R_2 - R_1)$, заломлюються на цей однаковий кут γ_1 , навколо точки F формується світлове коло, діаметр якого становить $\Delta d_1 = 2 (r_2 - r_1)$, де r_2 та r_1 — радіуси зон зображення е фокальній площині.

Зазвичай, центральна і перша нахилена зони формуються з однаковою шириною $\Delta R_k = R_1 = W$, що забезпечує фокусування променів в єдине центральне світлове коло (рис. 1). Величина R_2 другої нахиленої зони для заданого значення R_1 встановлюється відповідним вибором глибини рельєфу h : $R_2 = R_1 + h / \text{tg} \alpha_1$.

Після визначення радіусу R_2 аналогічно розраховуються параметри рельєфу для нахилених зон рельєфу $k = 2, 3, 4, \dots, N$, причому на кожному з етапів попередні дані становляться початковими даними комп'ютерних розрахунків для наступного етапу.

Кут γ_k визначається для кожної із конусних кільцевих зон у точці мінімального її радіуса. Вважається, що всі промені, які пройшли через кожну з таких ко-

нусних зон шириною $\Delta R_k = (R_{k+1} - R_k)$, заломлюються на цей однаковий кут γ_k та формують у фокусі відповідне світлове коло, радіус якого визначається значенням ΔR_k . При незмінному значенні $r_1 = R_1$ наступні зони лінзи $k = 2, 3, 4, \dots, N$ формуються з більшими значеннями $\Delta R_{k+1} = h / \operatorname{tg} \alpha_k$, для забезпечення незмінності радіусу зони r_1 необхідно відповідним чином збільшувати глибину мікрорельєфу h .

Запропонований алгоритм [1] дозволяє отримати параметри рельєфу, зокрема радіуси кільцевих зон R_k та відповідні кути нахилу граней $\varphi_k = \alpha_k$ для будь-яких значень r_1, f, h та для необхідної кількості кроків рельєфу N , тобто для необхідного діаметра лінзи D .

При створенні концентраторів світла основна відмінність від методу [1] створення фокусуєчої френелівської оптики полягає в тому, що замість формування у фокусі лінзи зображення джерела освітлення, в концентраторах необхідно з паралельного пучка пройдених світлових променів у фокусі сформувати рівномірно освітлене світлове коло. Розмір цієї центральної зони може бути досить великим. Стримуючим фактором є те, що при формуванні рельєфу методом алмазного різання застосовані алмазні різці мають ріжучу кромку, яка завдовжки не більше 1,6–1,8 мм, тому довжина робочих поверхонь мікропризм ($\Delta R_k / \cos \alpha_k$) або радіуси зон R_k , перш за все, розмір першої нахиленої зони $R_2 - R_1$, не можуть бути більшими за $\sim 1,5$ мм.

Для усунення цього обмеження необхідно формувати кожну з нахилених зон $k = 1, 3, 4, \dots, N$ концентратора з декількох кільцевих складових мікропризмових елементів, які сформовані з однаковим кутом заломлення мікропризм α_k . При цьому ширина ΔR_k складових елементів для кожної із зон у сумі дорівнює вибраній ширині центральної зони, що забезпечується відповідним варіюванням глибини рельєфу h і кількості складових елементів N_k . Фрагмент схеми такого концентратора світловим діаметром $D = 52$ мм, що складається з 5 складових мікропризмових зон № 1–5, наведена на рис. 2. Лінза призначена для формування світлового кола діаметром $d = 9$ мм на фокусній відстані $f = 20$ мм для довжини хвилі випромінювання $\lambda = 1,064$ мкм,

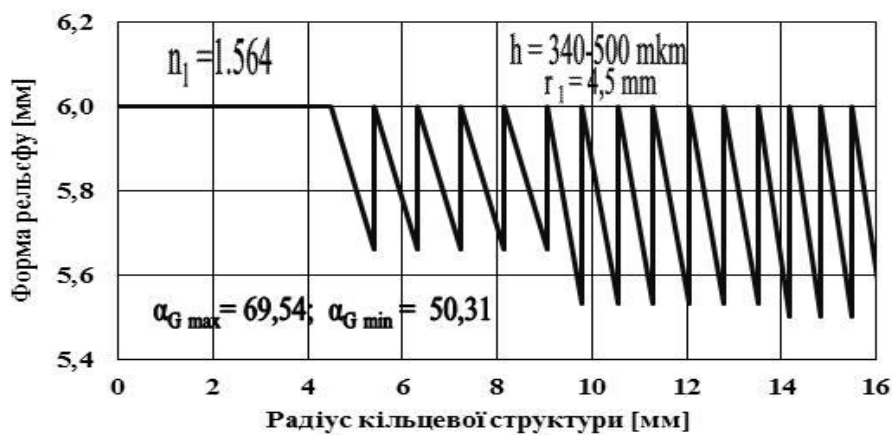


Рис. 2. Переріз кільцевого мікропризмового концентратора світла, створеного зі складових зон

Результати виконаних розрахунків параметрів зазначеного концентратора, що складається з 5 складових зон № 1–5 загальною кількістю 32 мікропризмові елементи, наведений на рис. 3. Саме такі табличні дані використовувалися при практичному виготовленні модельованого концентратора світлових потоків.

n	$r_1=r_1+\Delta r_1$	$\gamma_1=tg^{-1}(r_1/f)$	$\sin \gamma_1$	$\cos \gamma_1$	$\alpha_1=tg^{-1}(\sin \gamma_1/(1,564-\cos \gamma_1))$	$\Delta r_1=h*tg^{-1}\varphi_1$	$\beta=90-\alpha$	h	$\gamma+\alpha$	$\tau(fr)$	$\pi(fr)$	$\pi(r_2^2-r_1^2)\tau$	$\pi(r_2^2-r_1^2)$	Transm. zone 1-N	$\pi(r_2^2-r_1^2)\tau$	Transm. N-zone		
	$r_1=4.5\text{ mm}$	rad	deg		rad	deg.	mm	μm	deg.		x100	mm ²	mm ²	%		%		
0	0,000	0,000	0,00	0,0000	1,0000	0,000009	0,001											
1	4,500	0,221	12,68	0,2195	0,9756	0,357080	20,459	0,91135	69,541	340	33,14	0,949	94,900	60,3728	63,6173	94,9	60,3728	2,86
2	5,411	0,221	12,68	0,2195	0,9756	0,357080	20,459	0,91135	69,541	340	33,14	0,949	94,900	26,9299	28,3771	94,9	184,1737	8,72
3	6,323	0,221	12,68	0,2195	0,9756	0,357080	20,459	0,91135	69,541	340	33,14	0,949	94,900	31,8823	33,5957			
4	7,234	0,221	12,68	0,2195	0,9756	0,357080	20,459	0,91135	69,541	340	33,14	0,949	94,900	36,8347	38,8143			
5	8,145	0,221	12,68	0,2195	0,9756	0,357080	20,459	0,91135	69,541	340	33,14	0,949	94,900	41,7872	44,0328			
6	9,057	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	94,900	46,7396	49,2514			
7	9,801	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	91,600	40,3772	44,0799	93,1	290,0577	13,74
8	10,545	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	91,600	43,5635	47,5584			
9	11,289	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	91,600	46,7498	51,0369			
10	12,033	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	91,600	49,9361	54,5154			
11	12,777	0,425	24,36	0,4125	0,9110	0,563384	32,280	0,74406	57,720	470	56,64	0,916	91,600	53,1224	57,9939			
12	13,521	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	91,600	56,3087	61,4724			
13	14,165	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	44,5540	55,9723	87,2	355,3735	16,83
14	14,808	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	46,6252	58,5743			
15	15,452	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	48,6964	61,1764			
16	16,095	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	50,7676	63,7784			
17	16,739	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	52,8389	66,3805			
18	17,382	0,594	34,06	0,5601	0,8284	0,650774	37,287	0,64353	52,713	490	71,35	0,796	79,600	54,9101	68,9825			
19	18,026	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	490	81,22	0,598	79,600	56,9813	71,5846			
20	18,639	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	500	81,22	0,598	59,800	42,2439	70,6420	78,7	274,6617	13,01
21	19,252	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	500	81,22	0,598	59,800	43,6571	73,0052			
22	19,866	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	500	81,22	0,598	59,800	45,0703	75,3685			
23	20,479	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	500	81,22	0,598	59,800	46,4835	77,7317			
24	21,092	0,734	42,03	0,6695	0,7428	0,683989	39,190	0,61329	50,810	500	81,22	0,598	59,800	47,8968	80,0949			
25	21,706	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,598	59,800	49,3100	82,4581			
26	22,308	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	20,5823	83,3291	62,5	155,9122	7,38
27	22,911	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	21,1459	85,6110			
28	23,513	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	21,7095	87,8929			
29	24,116	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	22,2732	90,1748			
30	24,719	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	22,8368	92,4567			
31	25,321	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	23,4004	94,7386			
32	25,924	0,826	47,34	0,7354	0,6776	0,692578	39,682	0,60264	50,318	500	87,02	0,247	24,700	23,9641	97,0205			

Рис. 3. Фрагмент розрахунків параметрів концентратора

На рис. 2 наведено розрахунковий переріз концентратора з досить складними параметрами – необхідно створити світлове коло діаметром $d = 9$ мм на відстані $f = 20$ мм від плоскої фокусуєної лінзи світловим діаметром $D = 52$ мм, тобто відносний отвір лінзи (f/D) складає $\sim 0,38$, що досить екзотично. Моделювання параметрів концентратора виконано для довжини хвилі випромінювання $\lambda = 1,064$ мкм, коефіцієнт заломлення полікарбонату $n_1 = 1,564$ використаний з роботи [6], товщина утворюючої пластини становить $\delta = 6,0$ мм.

Для розглянутого прикладу ширина центрального плоского кола складає, відповідно, $R_1 = 4,5$ мм. Мікропризмові зони № 1–2 також створені аналогічної ширини $\Delta R_k = 4,5$ мм, для цього зони складено з 5 та 6 окремих мікропризмових елементів і визначено необхідні глибини рельєфу цих зон $h = 340$ та 470 мкм, відповідно. Наступні мікропризмові зони № 3–5 також розраховані складовими та створені з 6 та 7 окремих елементів для отримання сумарної ширини кожної із зон $\sim 4,5$ мм. Максимальна глибина рельєфу складає 500 мкм, яка є оптимальною для практичного виготовлення структури. Отримана залежність сумарної ширини кожної із зон 1–5 та окремих елементів ΔR_{k+1} від радіуса R_k наведено на рис. 4.

При моделюванні фокусуєної структури залежність коефіцієнта пропускання променів τ від кута падіння променів α_k на внутрішню грань структури розраховано за відомими формулами Френеля [5]. Результати наведено на рис. 5,а: крива 1 — паралельна компонента, крива 2 — перпендикулярна, крива 3 — сумарна залежність.

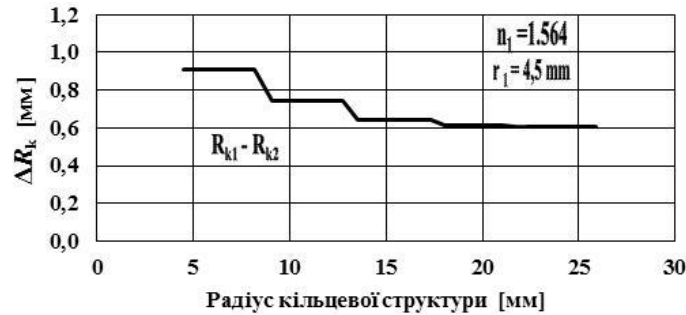


Рис. 4. Ширини складових елементів для різних зон мікропризмового концентратора світла з фокусом $f = 20$ мм і діаметром $D = 52$ мм

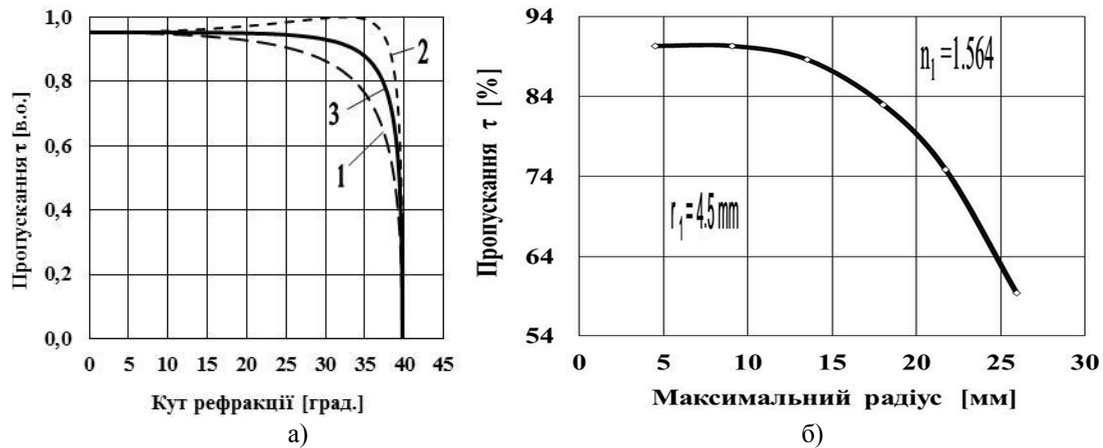


Рис. 5. Коефіцієнт пропускання променів τ_{np} : а) теоретична залежність для полікарбонату; б) отримані дані для реального концентратора

Унаслідок збільшення коефіцієнта відбиття променів τ_v при наближенні кутів відбиття до граничного кута $\alpha_{k \max}$ значно погіршується загальний коефіцієнт пропускання світла концентратором τ_{np} , тому збільшення діаметра концентратора D призводить до падіння загального коефіцієнта пропускання τ_{np} світла створеною структурою. Така залежність наведена на рис. 5,б — центральні зони концентратора пропускають 90,3 % світла, повнорозмірний концентратор — лише 59,5 %.

Розрахунки свідчать, що для формування такого концентратора з оптичного полікарбонату (ПК) необхідно використовувати алмазний різець з кутами ріжучої грані $\alpha_G = 50,32\text{--}69,54$ град. При цьому розрахункові кути нахилу робочих граней мікропризм α_k становлять $20,456\text{--}39,686$ град. Максимальне значення кутів практично збігається з граничним кутом променів, який для ПК становить $\alpha_{k \max} = 39,746$ град., при такому куті відбувається повне внутрішнє відбиття променів [3]. Тому внесок останньої мікропризмової зони № 5 до загального пройденого світлового потоку становить 7,03 %, при цьому коефіцієнт пропускання світла через зазначену зону № 5 не перевищує 23,5 %.

За цієї причини при подальшому практичному виготовленні концентраторів методом алмазного різання сформовано лише перші нахилені зони з мікропризмами № 1–4, що дозволило підвищити загальний коефіцієнт пропускання структури до значення $\tau_{np} = 74,9\%$.

Зображення реально створеного за результатами моделювання концентратора світлових променів наведено на рис. 6. Помітні усі групи № 1–4 призматичних елементів з однаковими кутами заломлення, визначеними за табличними даними з рис. 3.

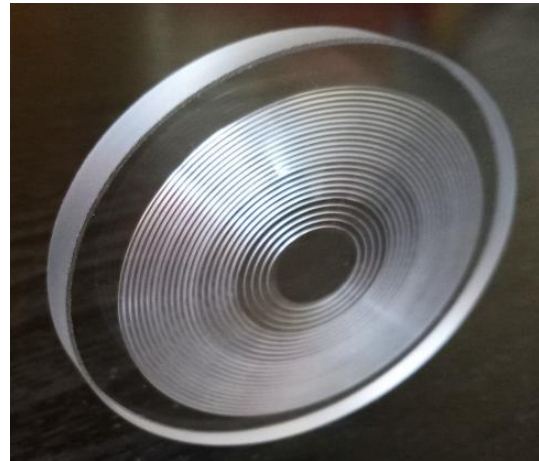


Рис. 6. Загальний вигляд концентратора світла для $n_1 = 1,564$ (ПК для $\lambda = 1,064$ мкм), створеного за результатами розрахунків

Дослідження створених мікропризмових концентраторів світла

Для дослідження оптичних параметрів розробленого концентратора було використано програму *Solidworks 2016* [7], за допомогою якої за наведеними вище табличними даними на першому етапі було створено комп'ютерну модель лінзи (рис. 7).

Модель лінзи у форматі *STEP* завантажена у програму *TracePro 7.3* [8] для здійснення подальшого моделювання ходу променів у наближенні геометричної оптики методом Монте-Карло. Джерело світла являє собою паралельний пучок променів (близько 200 тисяч), які рівномірно розповсюджуються в напрямку, перпендикулярному площині лінзи. Екран являє собою циліндр з радіусом $r_E = 25$ мм, розташований на певних відстанях f від рельєфної поверхні лінзи. Моделювана схема розповсюдження променів через концентратор для різних відстаней спостереження $f = 15, 20, 25$ та 50 мм наведена на рис. 8 — червоним кольором позначені падаючі та заломлені пройдені промені, синім — відбиті та заломлені після відбиття.

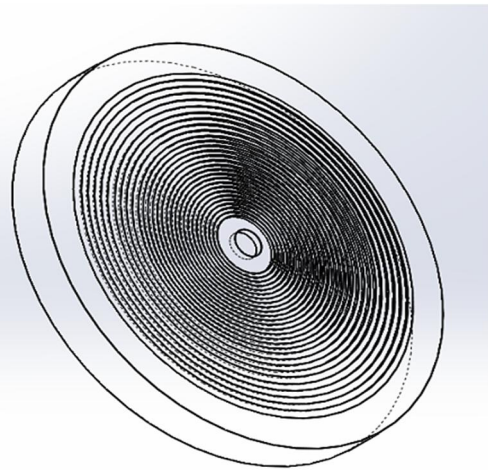


Рис. 7. Модель концентратора, створена за табличними даними розрахунків за допомогою програми *Solidworks 2016*

На наступному рис. 9 наведено деякі результати з моделювання розподілу інтенсивності на екрані для розглянутого концентратора в заданій точці фокусу $f = 20$ мм.

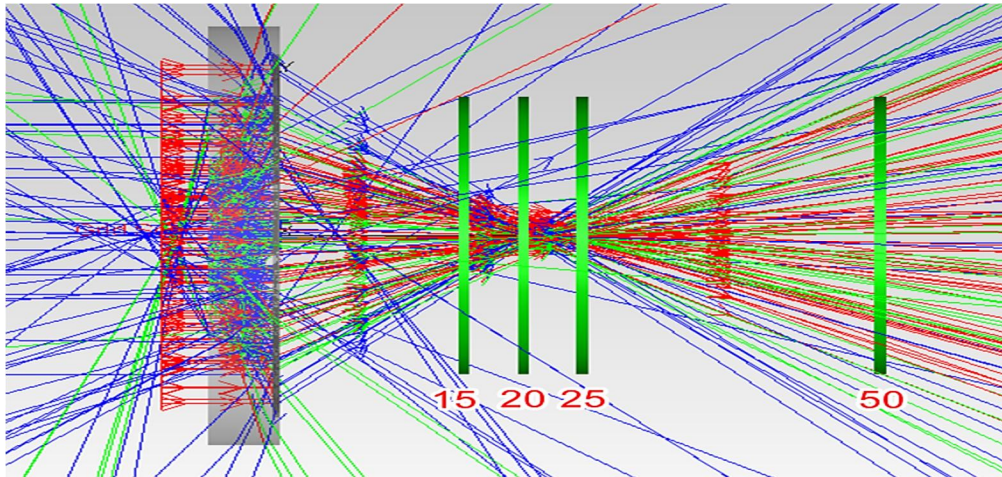


Рис. 8. Схема розповсюдження паралельних променів через концентратор для різних відстаней спостереження: $f = 15, 20, 25$ та 50 мм

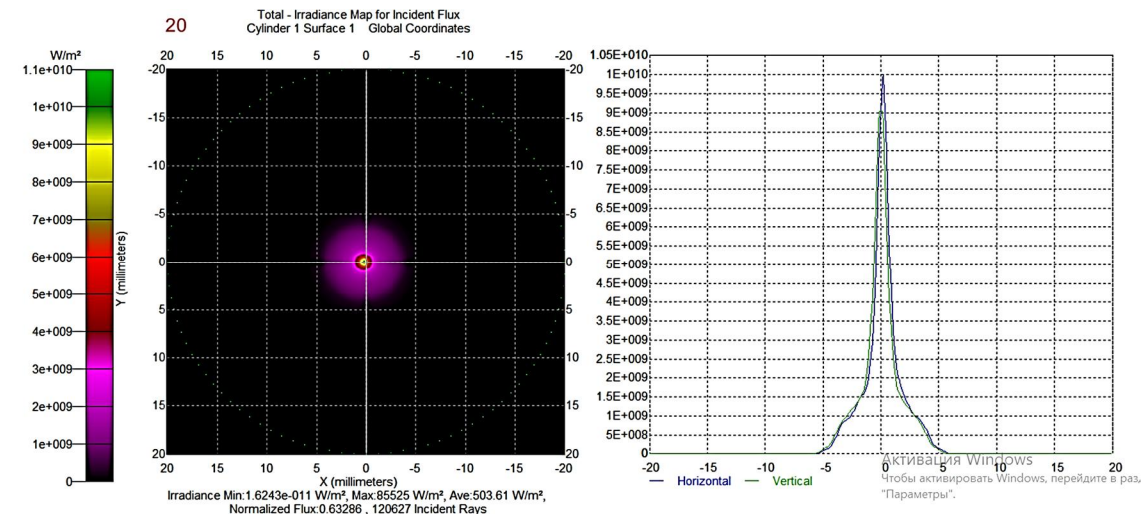


Рис. 9. Зображення на екрані та профіль пучка при трасуванні променів, за умови вибору полікарбонату як матеріалу лінзи для $\lambda = 1,064$ мкм та $f = 20$ мм

На рис. 10 наведено об'ємний профіль променів при освітленні розрахованої лінзи з полікарбонату світлом інфрачервоного діапазону.

Отримані в результаті моделювання дані свідчать, що розроблений концентратор достатньо ефективно перетворює паралельний пучок променів у світлове коло заданого діаметра, що відповідає поставленій задачі. Розподіл освітленості світла в площині фокусу в периферійній зоні екрана є близьким до однорідного, але спостерігається помітна концентрація світла у вузькій центральній зоні, що пов'язано зі зміною геометрії сфокусованих променів.

При збільшенні відстані спостереження f розроблений концентратор, звичайно, втрачає свої фокусуєчі властивості та формує серію кільцевих світлових структур, подібних до наведених на рис. 11 — кожна кільцева призматична зона № 1–4 лінзи, створена з однакових за кутом заломлення елементів, формує у фо-

кусі світлове коло шириною $\approx 4,5$ мм. Для точки фокусу всі світлові кола збігаються в одне кільцеве зображення, як свідчать дані рис. 9–10.

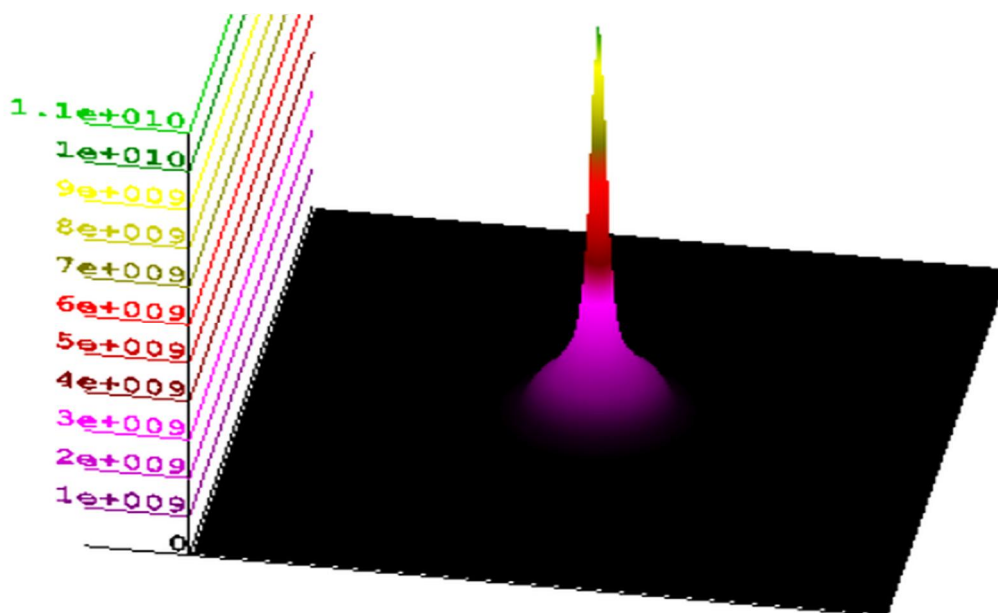


Рис. 10. Модельований об'ємний профіль променів, що пройшли через лінзу з полікарбонату для $\lambda = 1,064$ мкм та $f = 20$ мм

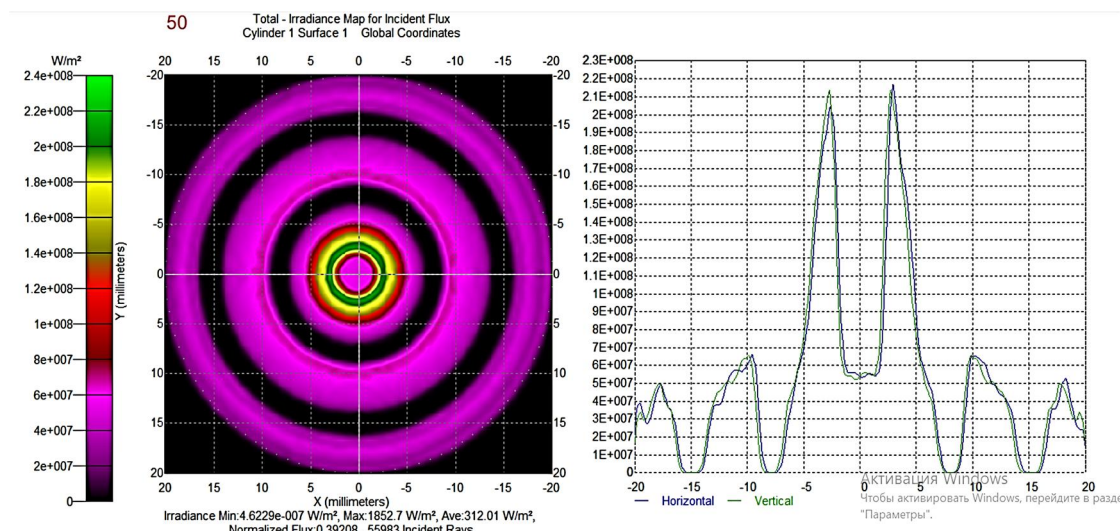


Рис. 11. Зображення на екрані та профіль пучка при трасуванні променів, за умови вибору полікарбонату як матеріалу лінзи для $\lambda = 1,064$ мкм та $f = 50$ мм

Заміна джерела освітлення з паралельними променями на точкове джерело з розбіжними променями призводить до відповідних змін фокусуючих властивостей концентратора, який починає функціонувати в нештатному режимі. Схема розповсюдження променів від точкового джерела радіусом $R = 5,0$ мм з кутом розширення променів 15 град., який розміщено на відстані 100 мм від концентра-

тора, та зображення на екрані відповідних заломлених променів наведено на рис. 12–13.

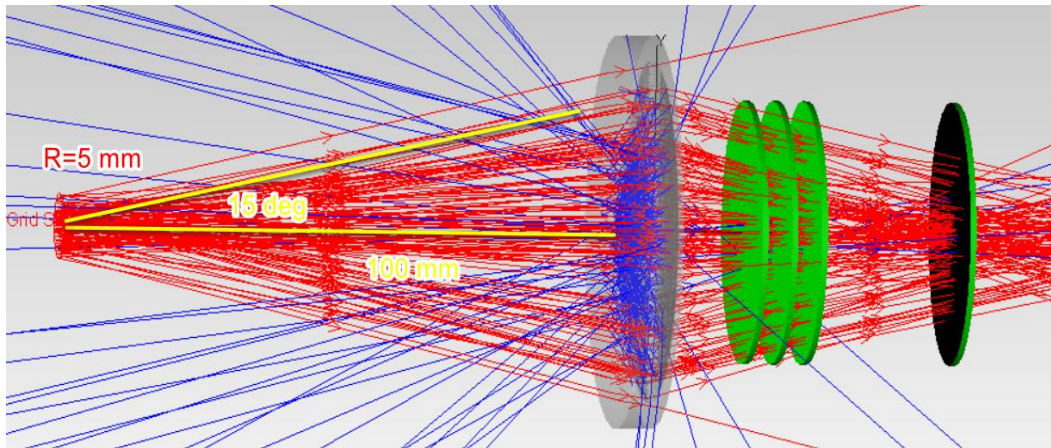


Рис. 12. Схема розповсюдження розбіжних променів через концентратор для різних відстаней спостереження $f=15, 20, 25$ та 50 мм

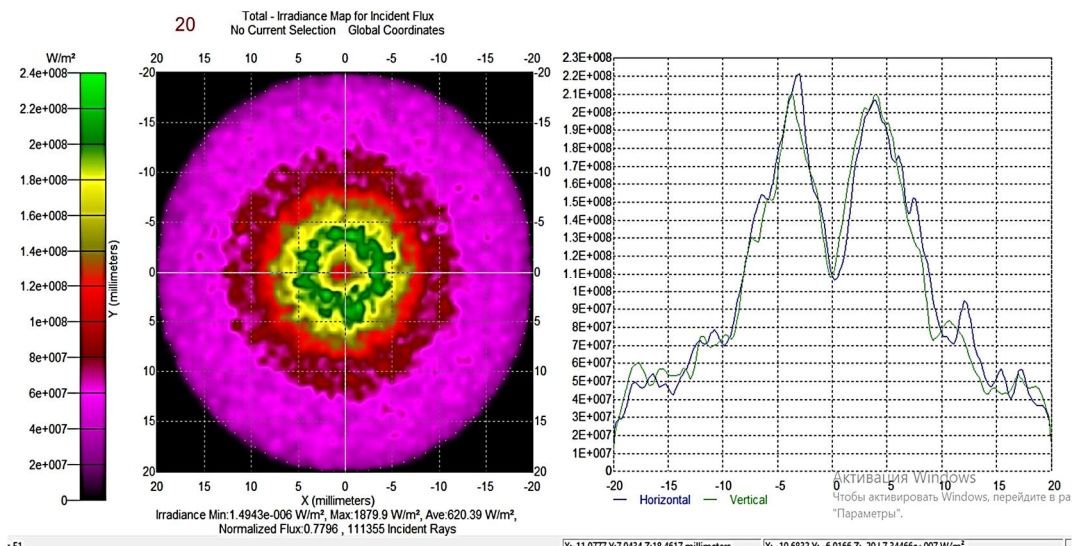


Рис. 13. Зображення на екрані та профіль пучка при трасуванні розбіжних променів для лінзи з полікарбонату для $\lambda = 1,064$ мкм та $f = 20$ мм

Загальні висновки

Розроблено алгоритм моделювання параметрів мікропризмових концентраторів світлових потоків. Запропоновано створення фокуруючих структур із груп складових призмових елементів, що забезпечує концентрацію пройденого випромінювання в гомогенізоване світлове зображення в фокусі лінзи. Виконано розрахунки параметрів оптичного концентратора, який забезпечує формування в фокальній площині світлового кола необхідного діаметра.

Результати моделювання підтверджують, що концентратор з дискретною зміною кута заломлення, на відміну від асферичних френелівських лінз з плавною

зміною кутів рефракції, є ефективним лише для заданої розрахункової відстані спостереження, при інших відстанях він втрачає свої фокусуєчі властивості. Пропускання світла концентратором, визначене при моделюванні променів, для інфрачервоного діапазону становить $\approx 86,4\%$, а для видимого — $\approx 84,1\%$, що свідчить про переважний вклад центральних зон пристрою в сумарне світлопропускання.

1. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Микропризмы в офтальмологии. Киев: Наук. думка, 2019. 224 с. ISBN 978-9660-00-1639-2.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. Москва: Машиностроение, 1979. 344 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. Москва: Наука, 1976. 928 с.
4. Полещук А.Г. Дифракционные оптические элементы: Методы синтеза и применение: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 2003. 41 с.
5. Петров В.В., Антонов Є.Є., Шанойло С.М. Хроматизм світла, дифракція та гострота зору в мікропризмових лінзах Френеля. *Рєєстрація, зберігання і оброб. даних*, 2010. Т. 12. № 1. С.49–54.
6. Sultanova N., KasaRova S., Nikolov I. DispeRsiOn pRopeRties of optical polymeRs. *Acta Physica Polonica A*. 2009. Vol. 116. P. 585–587. URL: <http://www.RefRactiveindexes.info>
7. SOLIDWORKS 2020. Внедрение инноваций в проектировании. URL: <http://www.solidwoRks.com>.
8. SoftwaRe foR design and analysis of illumination and optical systems. URL: <https://www.lambdaRes.com/tRacepRo/>

Надійшла до редакції 16.10.2020